



# Impact des stress mécaniques sur le développement des arbres : vent et gravité

Eric BADEL

[eric.badel@inrae.fr](mailto:eric.badel@inrae.fr)

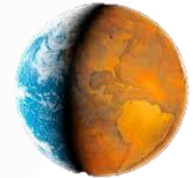
Chercheur – INRAE Clermont-Ferrand - PIAF

Laboratoire de Physique et Physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant

Mercredi 18 Mai 2022

# Les arbres dans un environnement fluctuant

Crises environnementales changements climatiques globaux



## • effets des principaux facteurs physiques



- Température
  - Eau
  - Vent (+ gravité)
- x Lumière

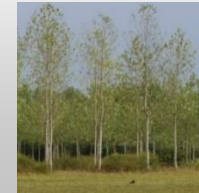
## ...qui jouent sur ...

- Production (quantité / qualité)
- Vulnérabilité aux stress abiotiques
- ...et biotiques

## *Acclimatation et adaptation génétique*

- Trouver des géotypes plus **resistant** / **resilient**
- Adapter, proposer des modes de conduits innovants dans un contexte **agro-écologique**

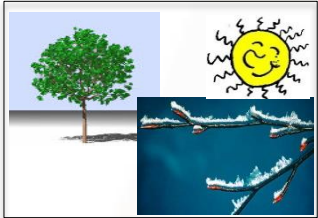
- **les arbres dans tous leurs contextes**  
(foret, horticulture, agro-foresterie, urbain)



# 4 équipes de recherches

## Température

### MEA



Micro-Environment et arbres



**Marc Saudreau**  
CR INRAE

Vulnérabilité aux températures extrêmes et aux attaques abiotiques

## Mécanique

### MECA



Biomécanique de l'arbre



**Nathalie Leblanc-Fournier**  
MCF UCA

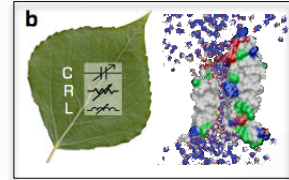


**Eric Badel**  
CR INRAE

Résistance et résilience au vent

## Hydraulique

### FoIEau



Transport d'eau dans les feuilles



**Philippe Label**  
DR INRAE

Fonctionnement hydraulique des feuilles

### SurEau



Sécurité hydraulique et résistance à la sécheresse



**Stéphane Herbette**  
MdC HDR UCA

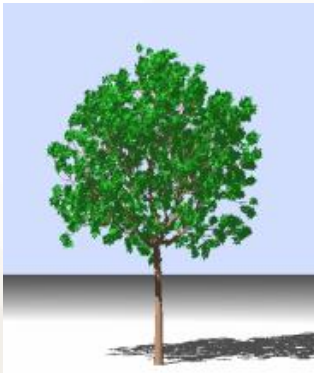
Sécurité hydraulique / vulnérabilité des arbres aux sécheresses extrêmes

# Le vent : pérennité de l'arbre et qualité des tiges

## Les tempêtes : un défi important

- Dernières décennies : plusieurs tempêtes centennales. Récolte de 2 années en 1 nuit
- Dégâts aussi sans « casse » : déchaussements partiels => inclinaison => rectitude des troncs

## Vision classique : l'aléa



1. l'arbre pousse et déploie son architecture selon son environnement lumineux, thermique, hydrique, minéral ..
2. avec un dimensionnement fonction du génotype et de la station / du microclimat

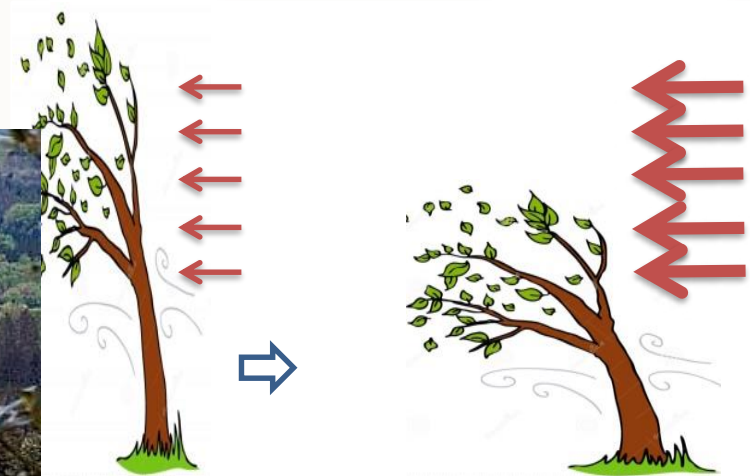
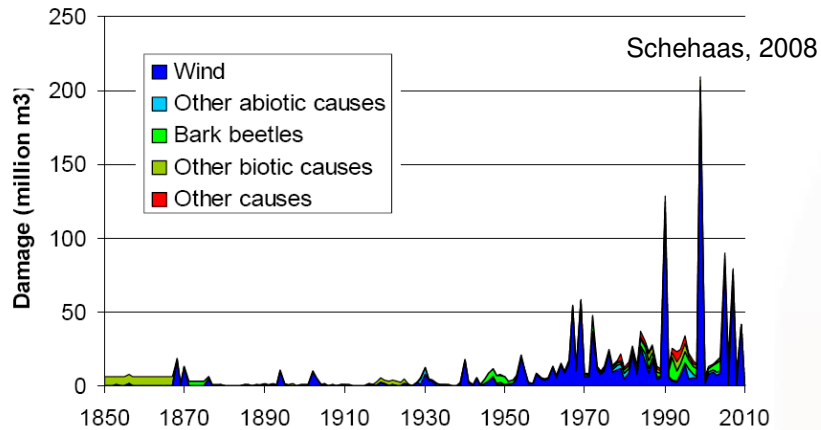


si “hasard météo” = vent trop fort sur peuplement “mal géré”

- **verse** ( inclinaison permanente)
- **casse** (volis-chablis)

↪ **Pb : mauvaise prédiction de l'évolution à long terme des seuils critiques de casse et de verse ( croissance du peuplement, changements climatiques)**

# L'acclimatation, une question de survie



...des inégalités face au vent

...ils s'acclimatent ou il cassent !

Leur secret : ils ont l'habitude du vent et ils sont "plastiques" !

## 2 processus de survie

Comment les arbres tiennent debout (tout en croissant) dans un environnement mécanique fluctuant ?

Résistance / acclimatation-  
vents chroniques

Résilience / événements  
extrêmes (vents forts)

Contexte des changements climatiques

Fréquence des événements extrêmes liés au vent dans le cadre des changements globaux, avec des vents chroniques plus faibles



Stratégie 1:  
Mécanorégulation de la croissance

Stratégie 2:  
Contrôle postural :  
interactions gravi et  
proprioceptions

# Plantes et sollicitations mécaniques

Les plantes sont sans cesse soumises à de nombreuses forces (chargements mécaniques) permanentes ou transitoires...



Poids propre



Obstacle



Fruits



Neige



Courant marin



Contact transitoire



Vent

qu'ils perçoivent !

# Les plantes perçoivent les stimulations mécaniques



*Mimosa pudica*, la sensitive



La dionée

## SENSIBILITÉ

PERCEPTION

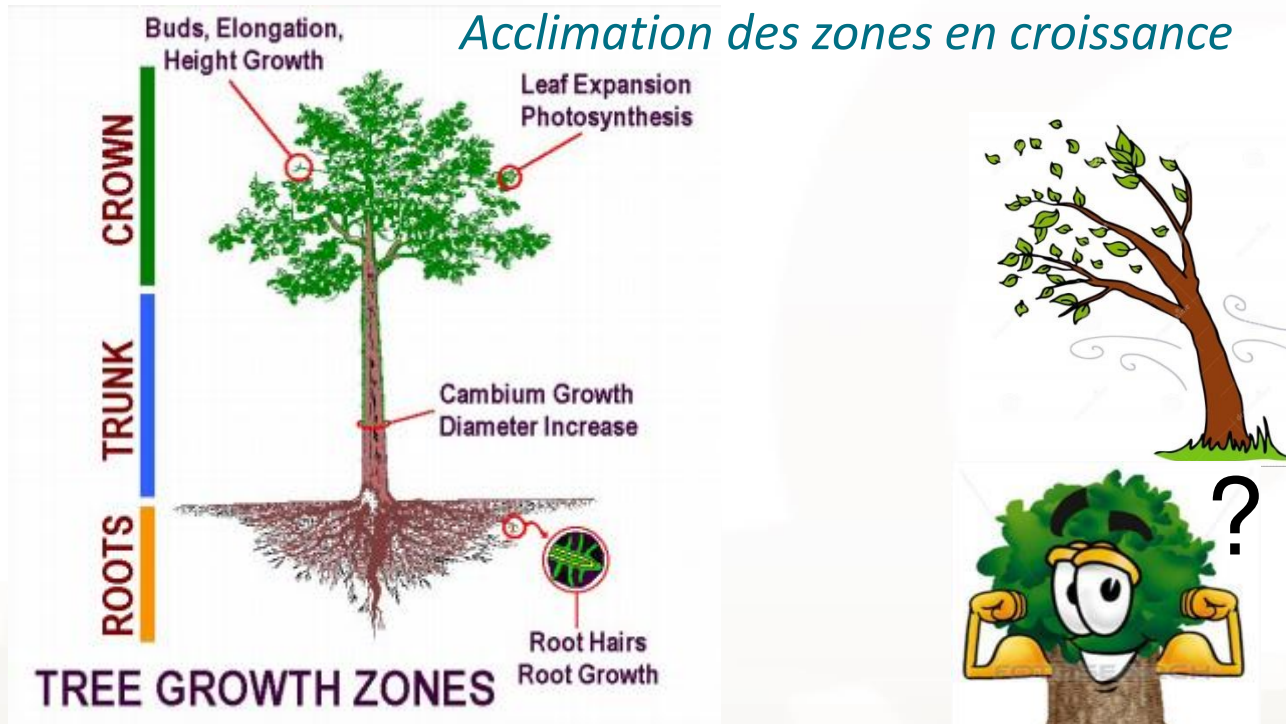
RÉPONSE

*Le toucher de la foliole  
Le toucher de poils sensibles*

*Un mouvement  
par variation rapide de pressions*

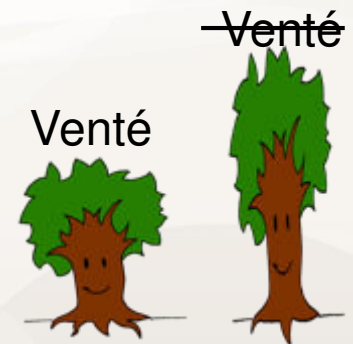


# La thigmomorphogénèse : l'acclimatation des plantes aux sollicitations mécaniques



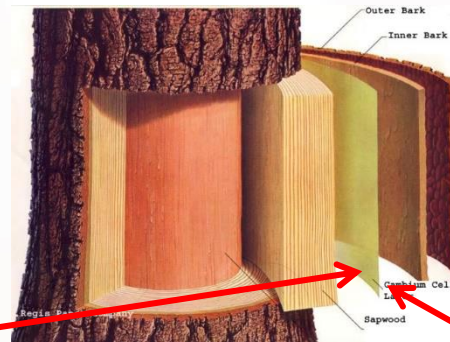
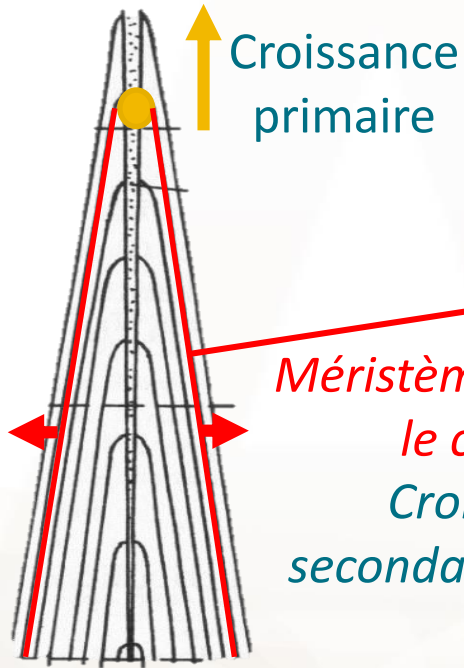
Le développement de l'arbre est impacté

- Croissance secondaire (diameter) localement accrue
- Réduction de la croissance primaire (hauteur) à distance
- Allocation de biomasse modifiée
- Système racinaire renforcé

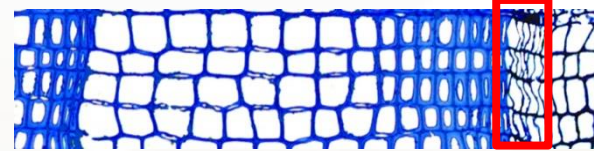


# Variabilité de la formation du bois

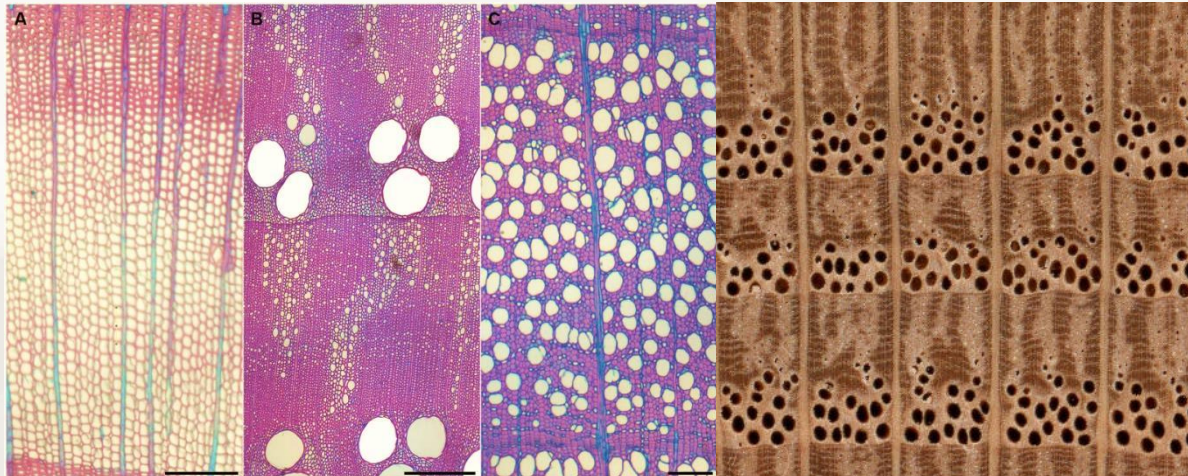
## Méristème primaire



*Méristème secondaire :*  
*le cambium*  
Croissance  
secondaire (radiale)

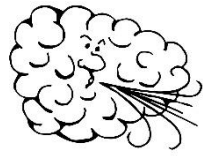


- ### Formation du bois
- Origines génétiques
  - Environnementales



# L'acclimatation: une chaine du stimulus physique à l'avantage adaptatif

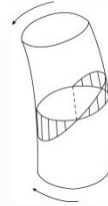
Stimulus  
extérieur



$$F = \frac{1}{2} \rho C A U^2$$

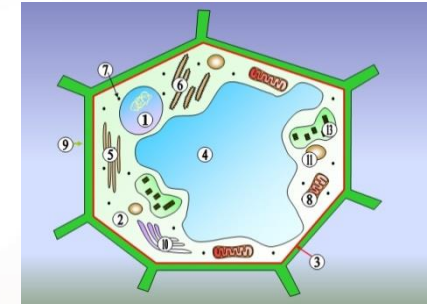


Chargement de  
la structure

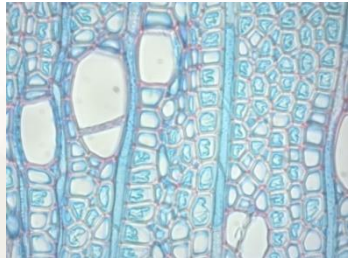


Chargement local

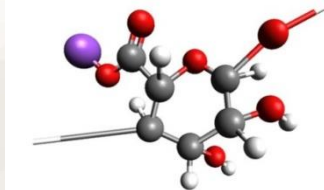
$$\epsilon_{zz}(r, \theta)$$



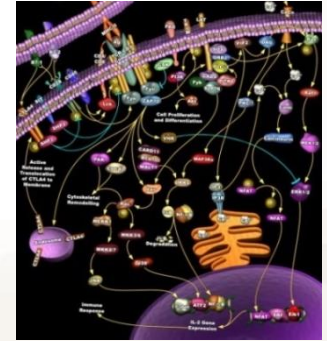
Modifications du  
développement de  
l'arbre



Activations moléculaires

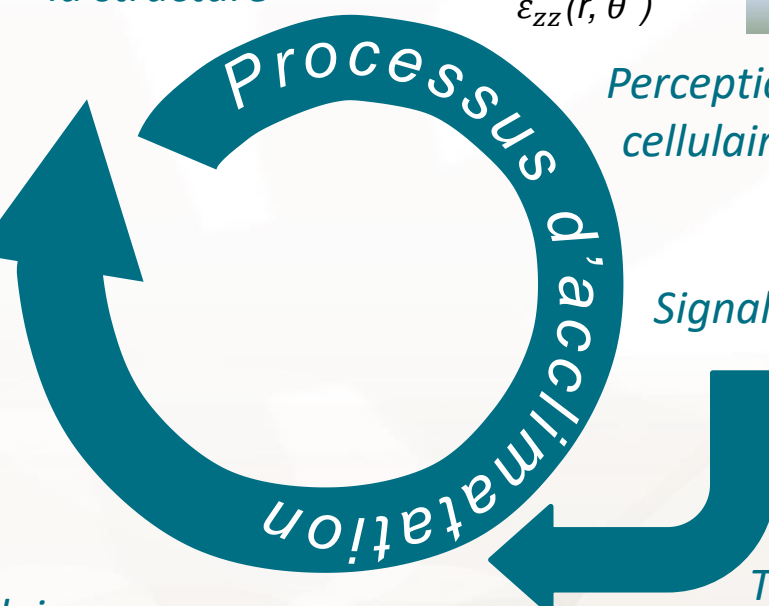


Perception  
cellulaire

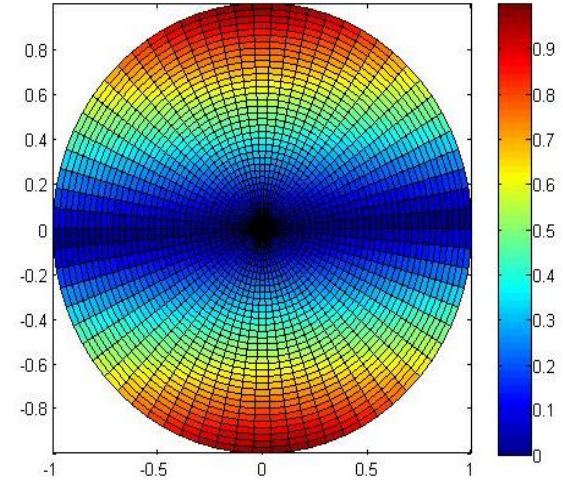
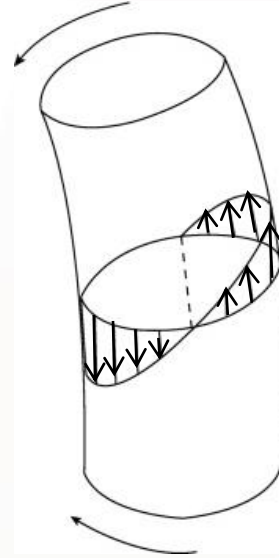


Signalisation

Transport de signaux



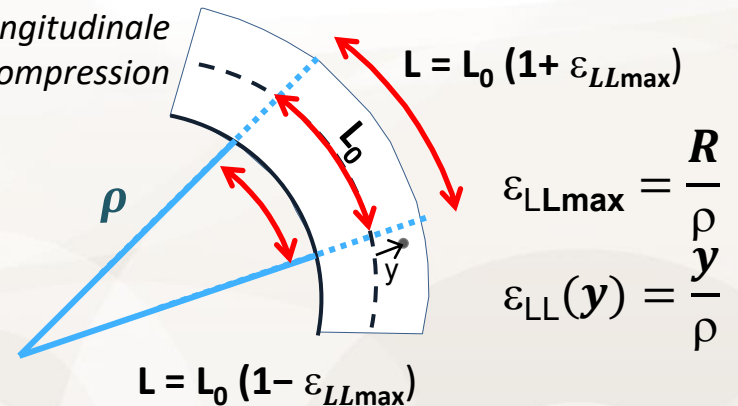
# En laboratoire : des stimulations contrôlées pour mimer l'effet du vent



Mimer l'effet mécanique du vent en laboratoire :

- Flexions de tiges
- Fréquence contrôlée
- Contrôle du champ de déformation (rayon de courbure ajusté)

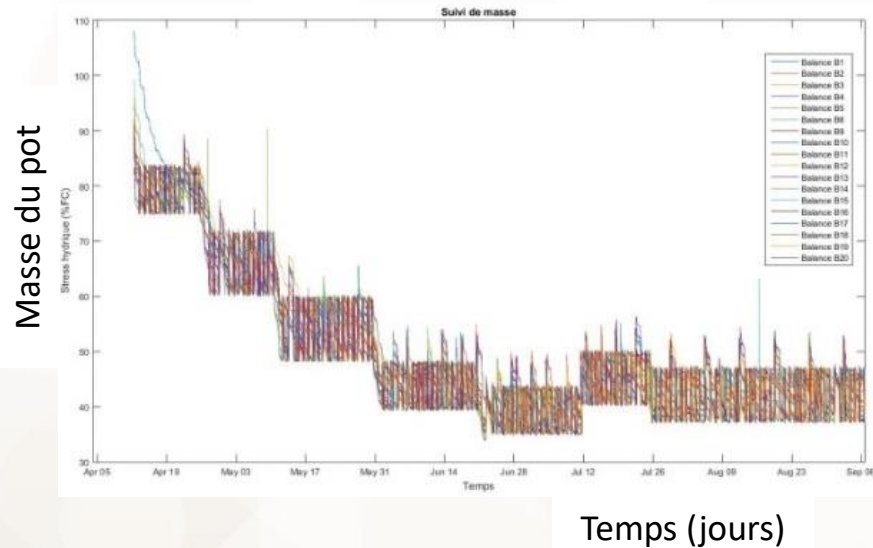
½ tige en tension longitudinale  
½ tige en compression



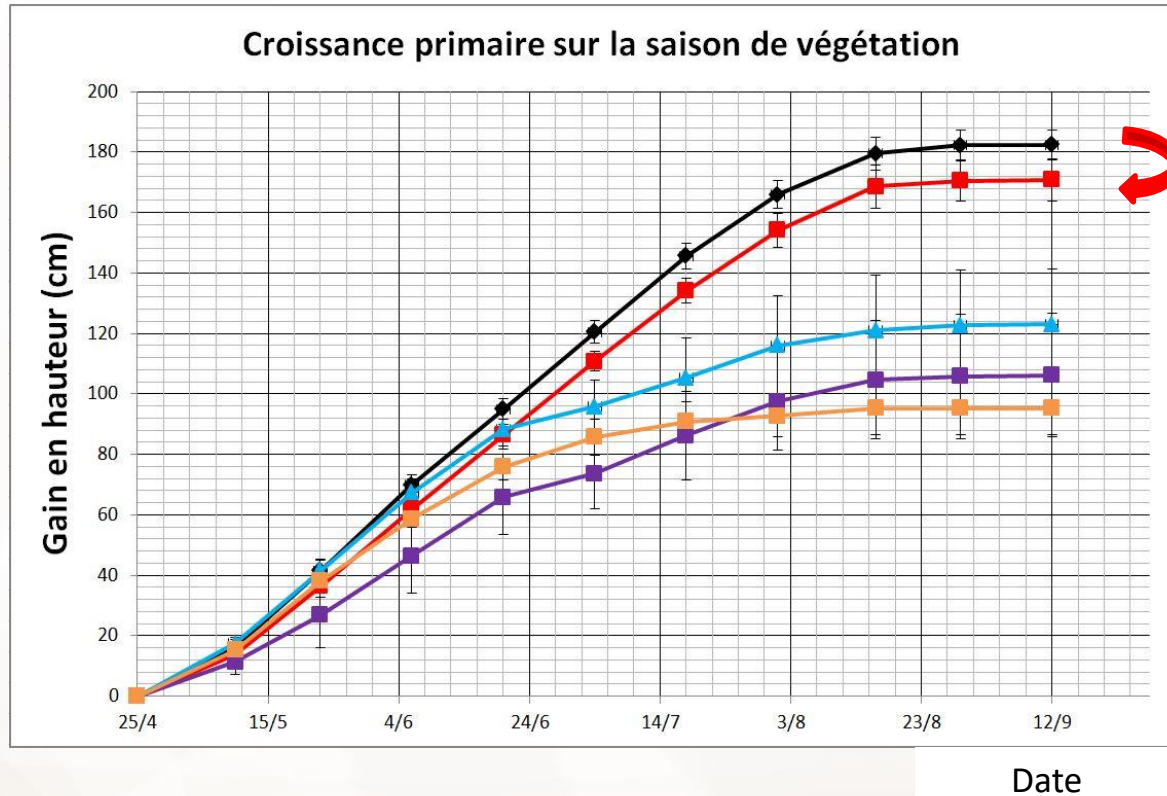
# En laboratoire : des stimulations contrôlées pour mimer l'effet du vent

*Et aussi sous stress hydrique !!*

Stress hydrique contrôlé



# Conséquences sur la croissance en hauteur

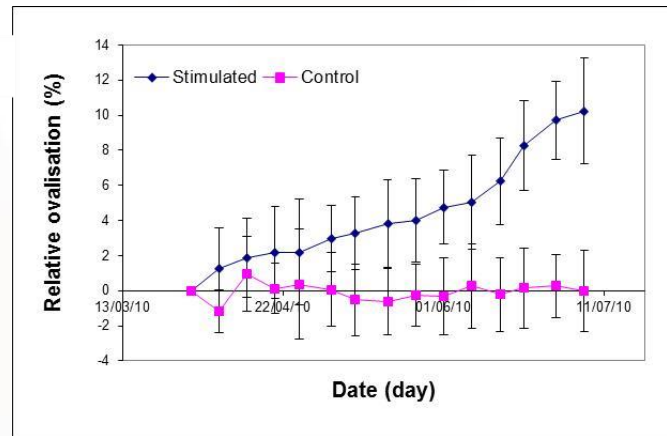
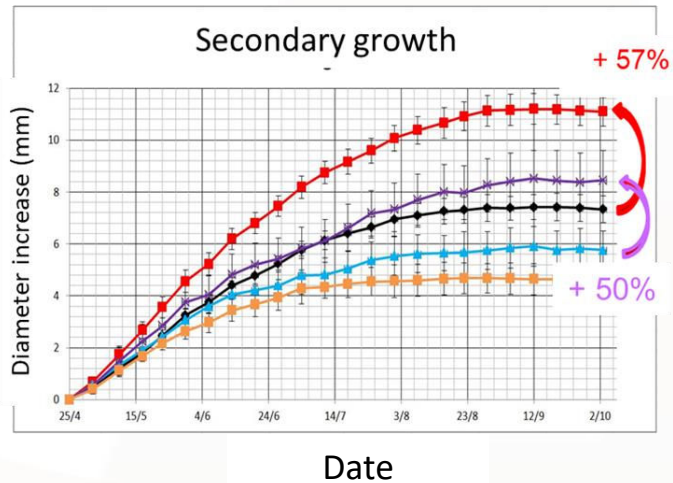


■	Témoin (T)
■	Stress hydrique (SH)
■	Stress mécanique (SM)
■	Stress simultané (SMH)

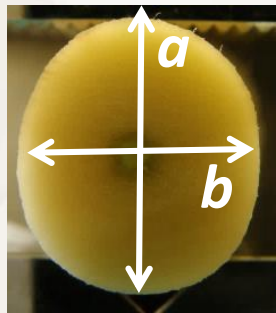
*Réduction de la croissance en hauteur*

# Conséquences sur la croissance en diamètre

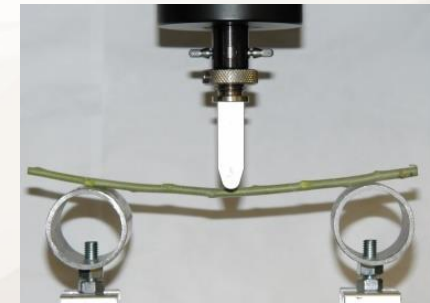
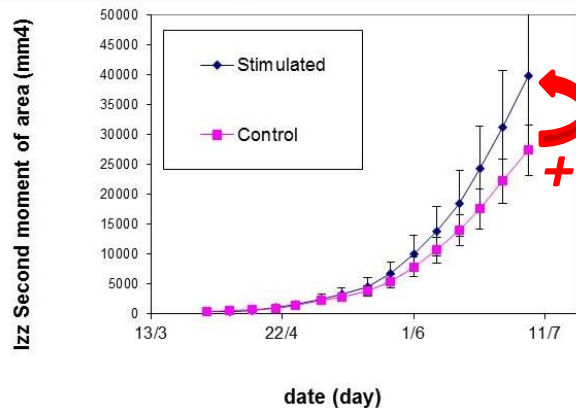
- Stimulation locale de la croissance secondaire :  
une ovalisation des tiges fléchies



- Bénéfice adaptatif mécanique : la rigidité de la tige est nettement augmentée



$$I_{yy} = \frac{\pi a^3 b}{64}$$

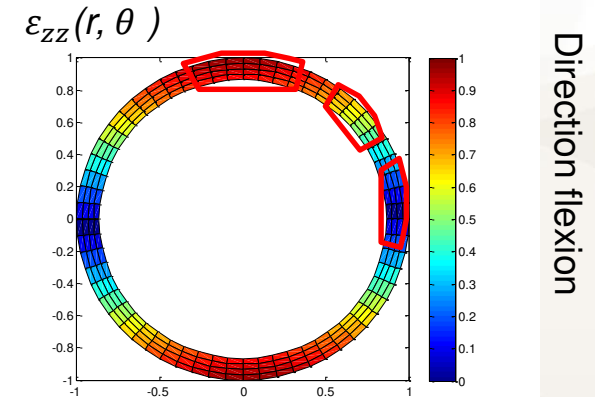
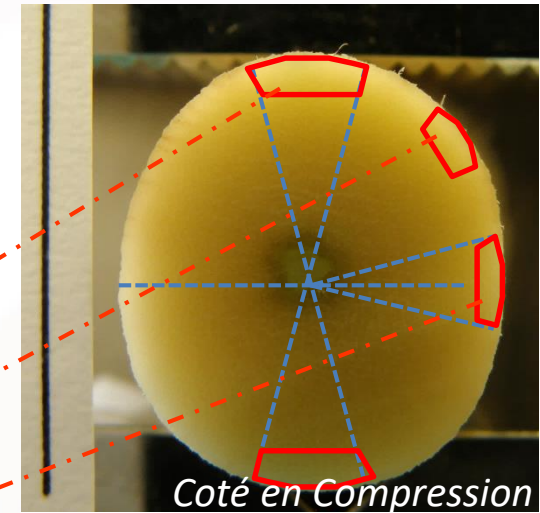
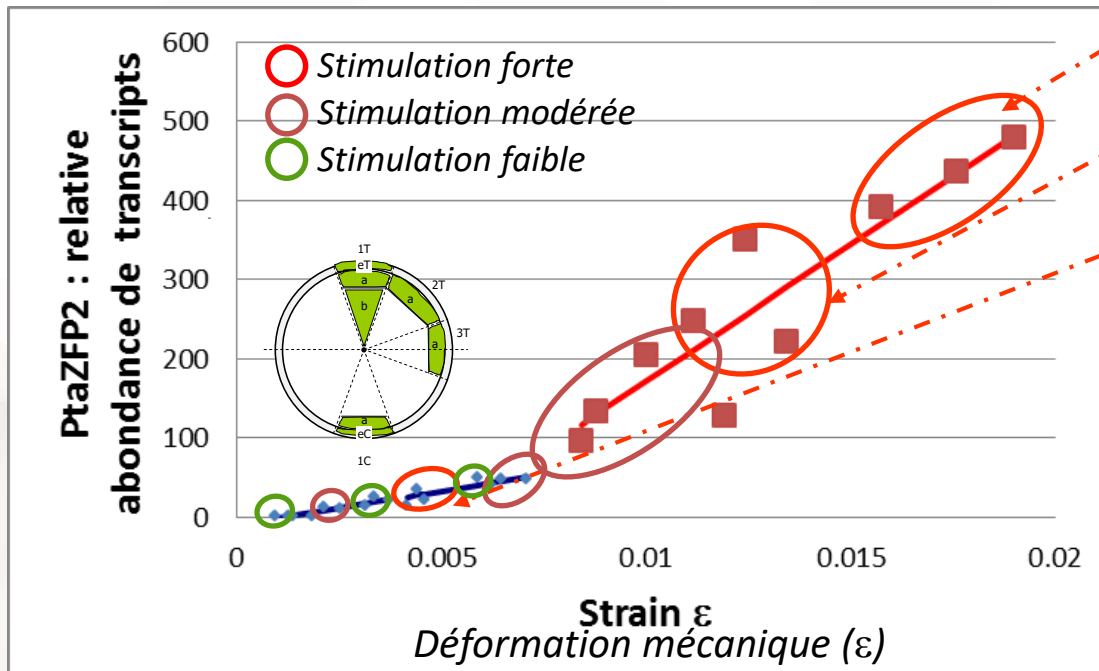


$I_{yy}$    
=> déformation réduite

# Comment évaluer la perception ?



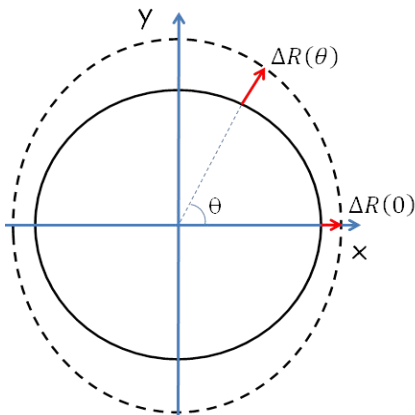
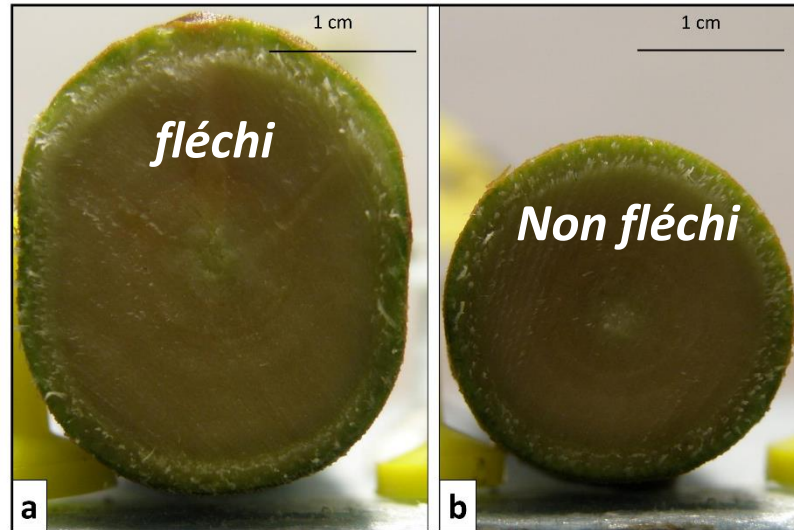
*Des acteurs moléculaires de la  
mécanoperception*



*sites de perception : cambium, rayon ligneux...?*

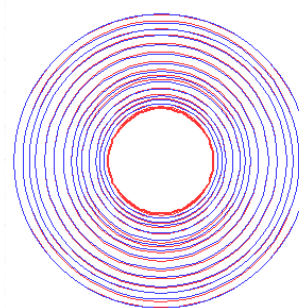
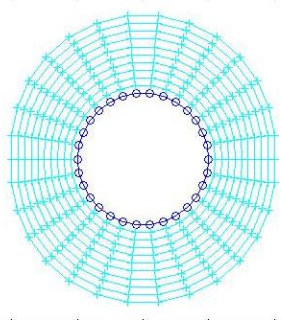


# Des modèles pour expliquer l'ovalisation

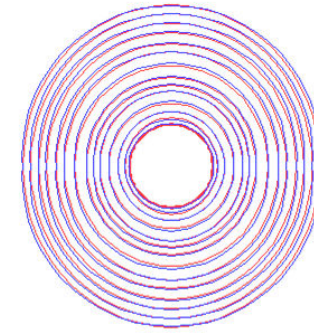


— Mesures expérimentales

— Modèle



Témoin



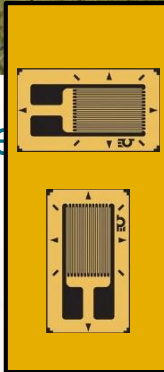
Fléchi

$$\Delta R(\theta, t) = \Delta R(0, t)(1 + \alpha |\varepsilon_{LL}(\theta)|)$$

# En milieu naturel : mesures

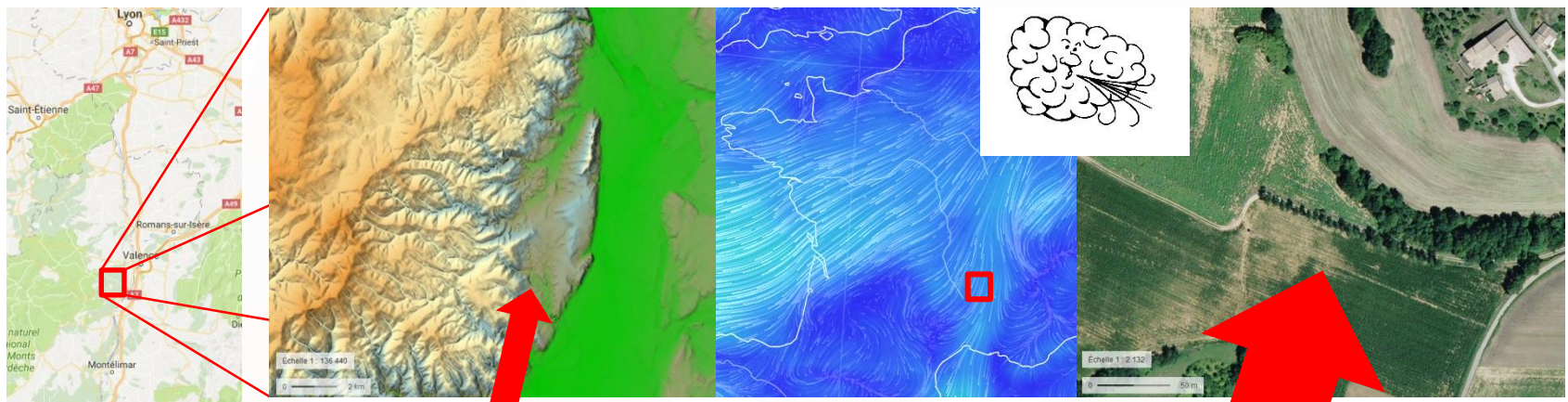


Sollicitations naturelles

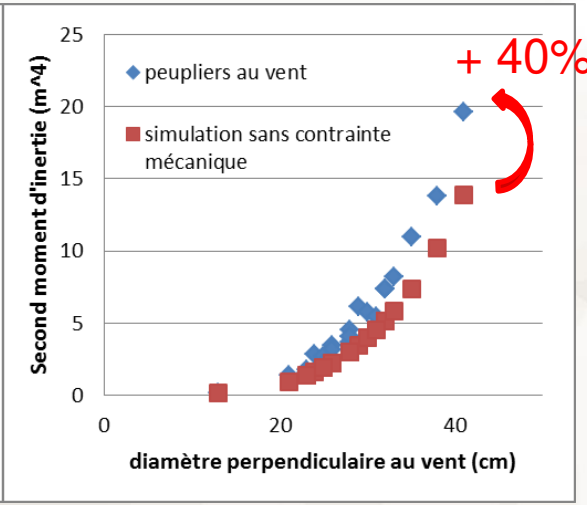
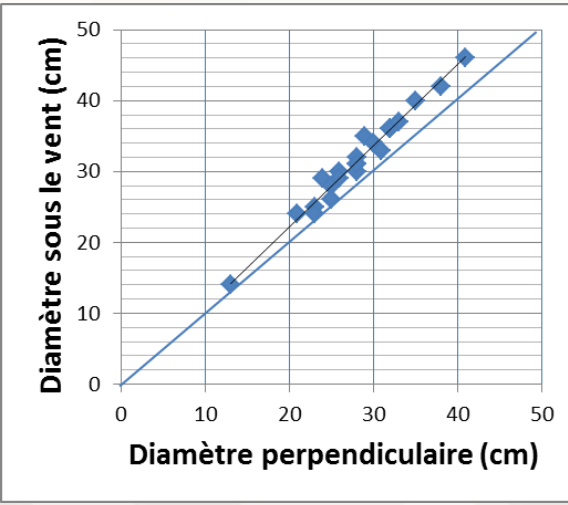


Sollicitations artificielles

# Une expérimentation grandeur nature dans le couloir Rhodanien

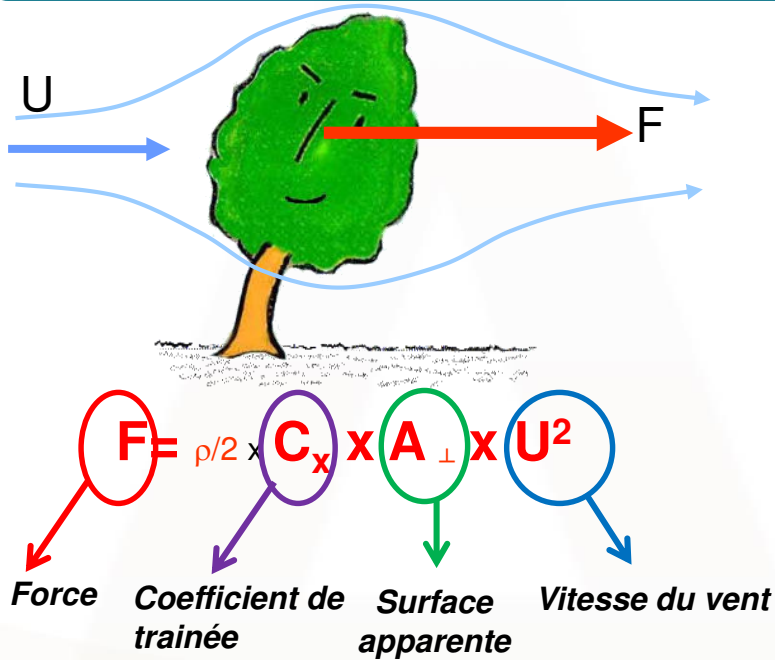


- 23 Peupliers I214
- Couloir de la vallée du Rhône
- Plantation en ligne ⊥ aux vents dominants (alternance mistral – vent du sud)
- 22 ans



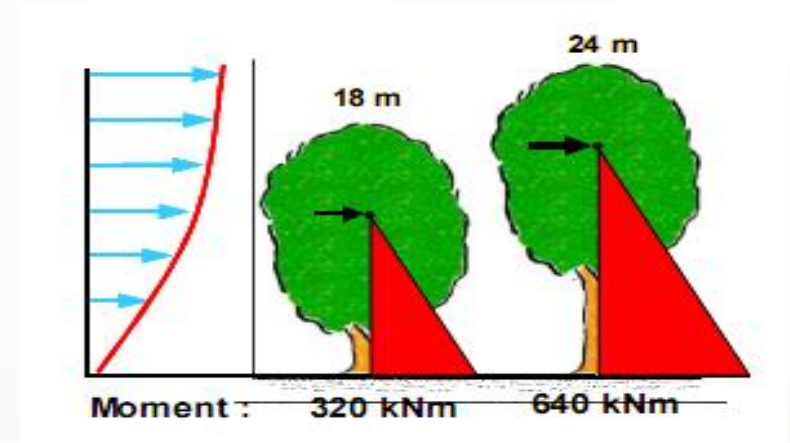
➤ => déformations réduites lors des gros coups de vent

# L'acclimatation est-elle adaptative (bénéfique) ?



*La hauteur de la plante influe sur :*

- *le bras de levier*
- *le profil du vent*



## Thigmomorphogénèse :

- Hauteur réduite
- Diamètre de la tige augmenté
- Propriétés modulées

=> ++ sur le bras de levier

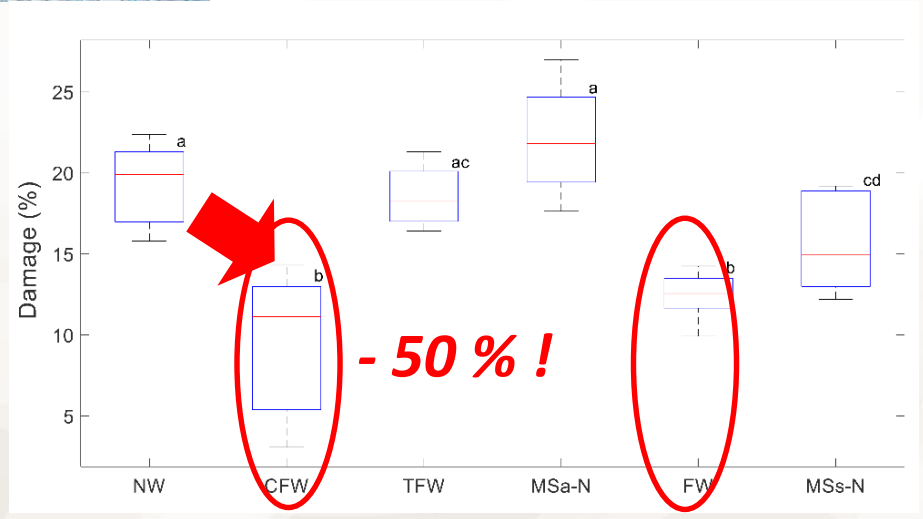
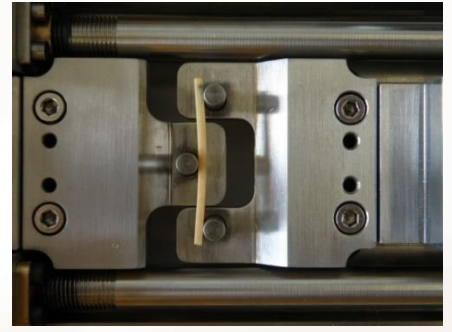
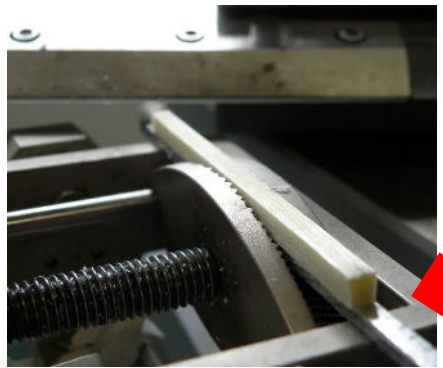
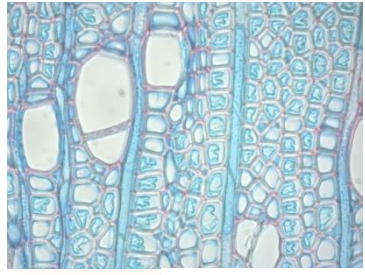
=> ++++ sur les déformations résultantes

=> + sur le risque de casse des tissus

↳ *Pas stupide comme réaction !!! Plutôt pertinent, non ?*

# Acclimatation du bois et de ses propriétés

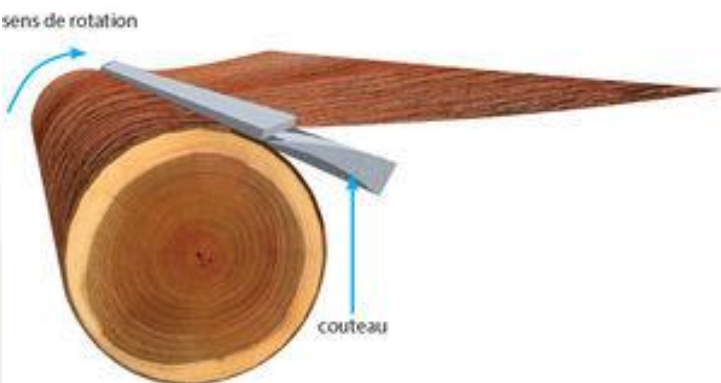
Structure anatomique du bois formé  
Densité, taille/nb de vaisseaux, paroi cellulaire,  
ultrastructure





Micromécanique (rigidité, limite élastique, plasticité...)

Endommagement réduit de moitié : **un bois capable d'encaisser** des déformations importantes

# Acclimatation du bois et de ses propriétés



- Déroulage : perte de matière sur sections ovalisées 
- Propriétés : un bois capable d'encaisser des grandes déformations sans dommage 

# Applications en serriculture mécanique vs chimie

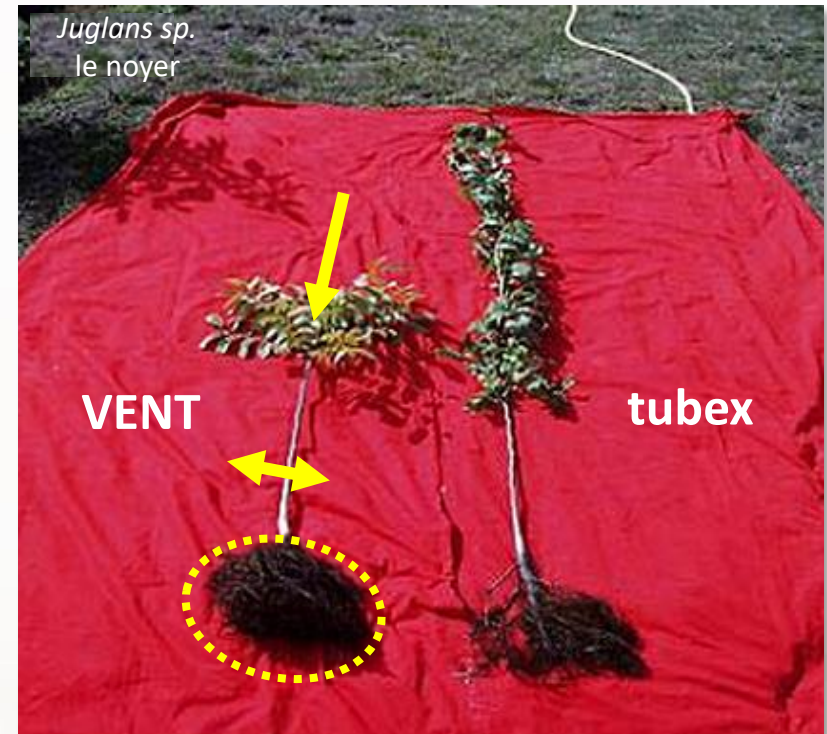


- balayage horizontal
- Zone en croissance seule sollicitée
- Fréquences : 1 fois /H ou 2 fois /H

- Impacts sur la croissance en diamètre
- Impact sur la croissance en hauteur
- Impact sur la branchaison
- Impact sur la floraison



# Applications en plantations



C. Coutand

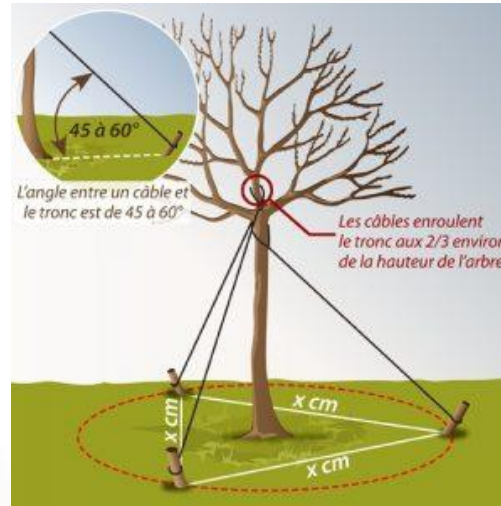
## Protection des plantations

- Plus ou moins « hermétiques » au vent
- Bloquent plus ou moins le mouvement des arbres

**Systèmes racinaires** renforcés par les sollicitations mécaniques. Nécessité de lui faciliter son développement dans un environnement complexe



# Gestion



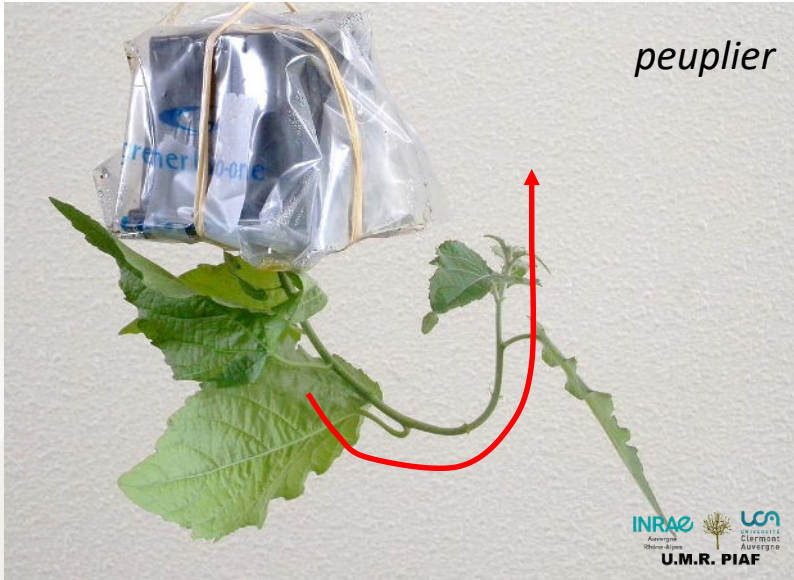
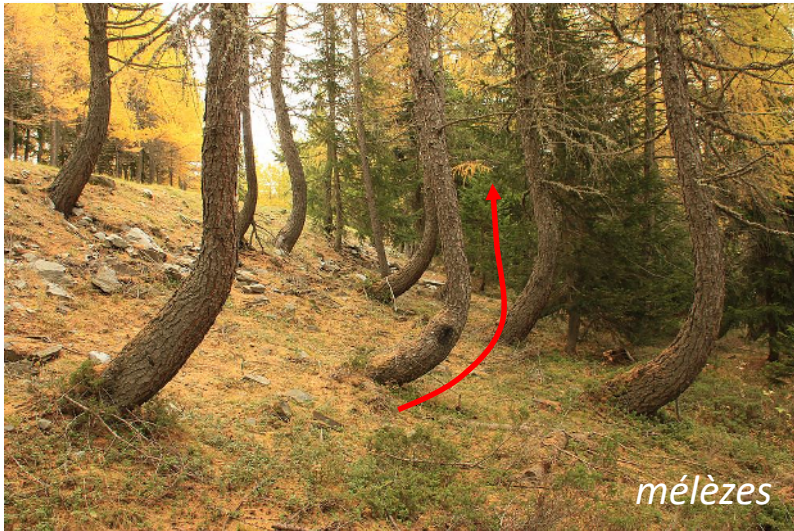
- Densité de plantation (impact sur Hauteur/Diamètre)
- **Attention au tuteurage trop serré !!! Préférez les tuteurages souples**
- Interventions sur l'arbre en ville : modifications de l'exposition des branches au vent. Risque de casse
- Interventions sur les voisins (élagage, éclaircies en forêt en fin d'hiver, trouées, coupes rases) : exposition d'arbres précédemment « protégés »



Des recommandations dans les zones à risques



# Se redresser vers le haut



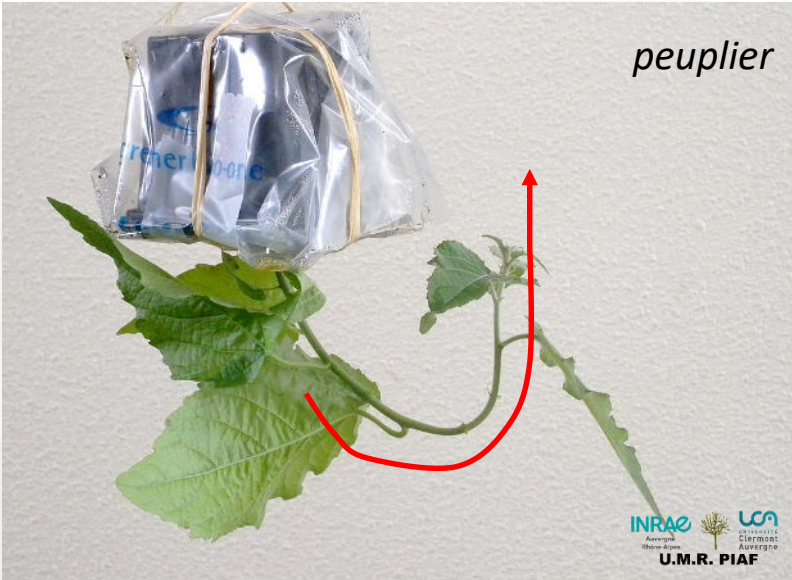
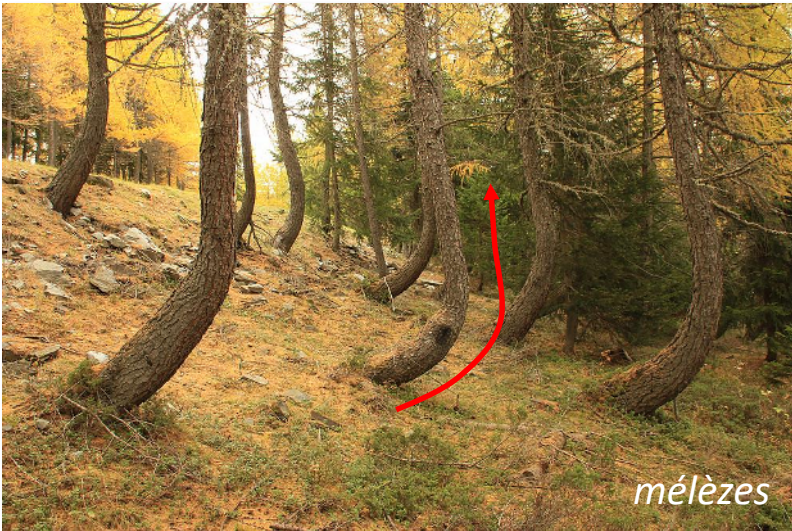
**SE REDRESSER en cas d'inclinaison**



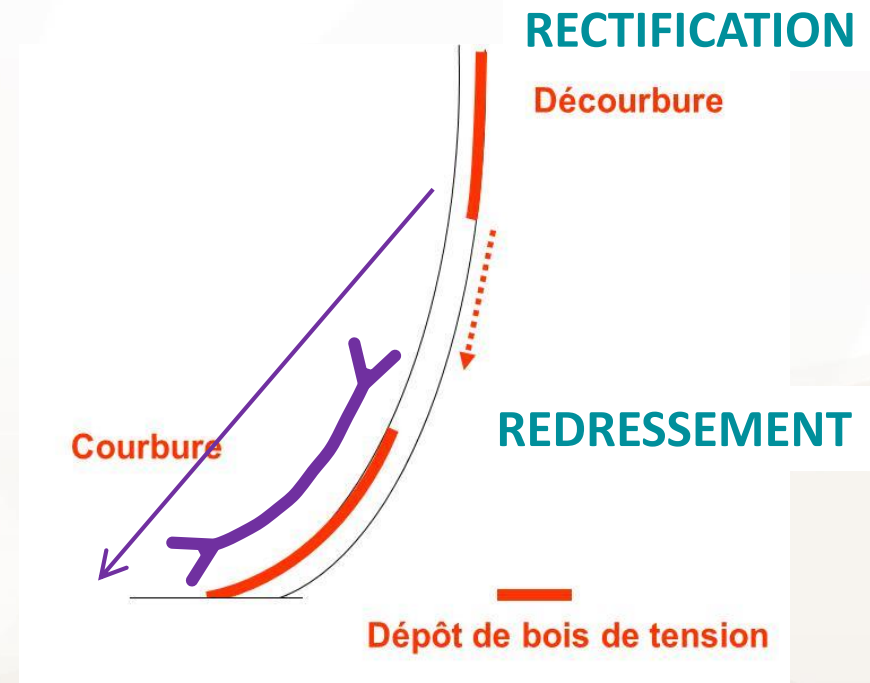
**= RÉSILIENCE**



# Se redresser vers le haut



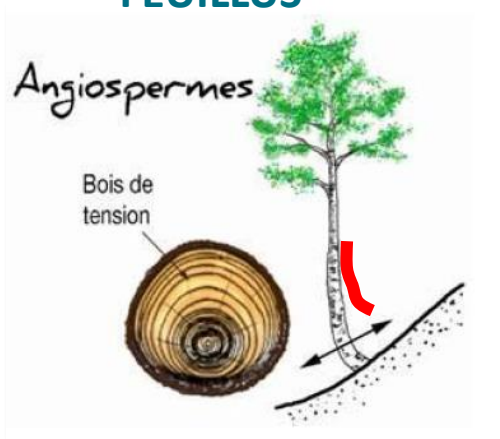
L'arbre incliné se **contorsionne**  
Il se **courbe** et se **décourbe**





# Le redressement : comment ça marche ?

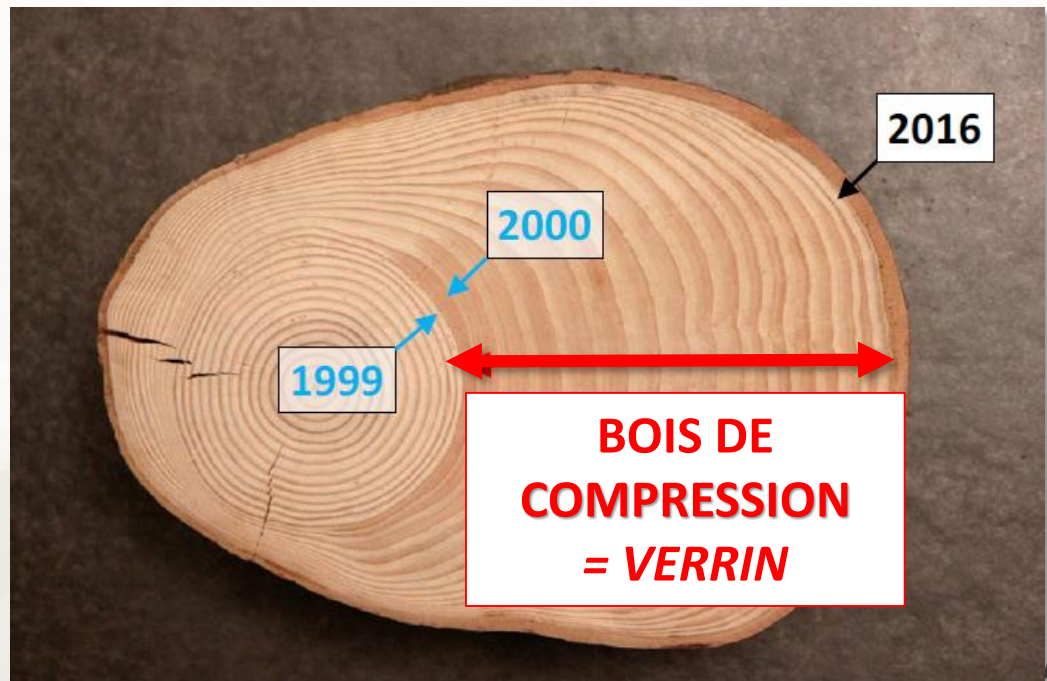
## FEUILLUS



Il faut des muscles !

**BOIS DE TENSION  
= HAUBANS**

## CONIFÈRES



# Perception de l'inclinaison ?

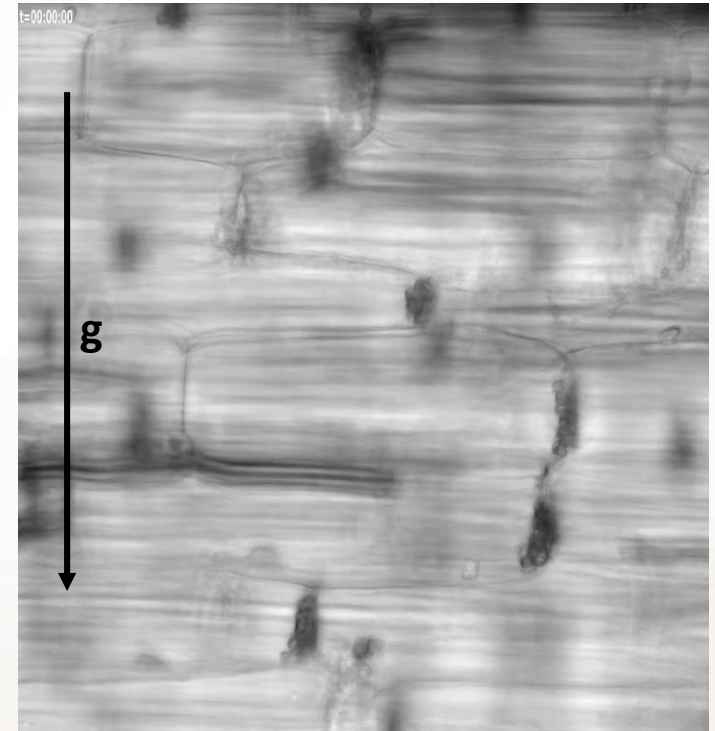
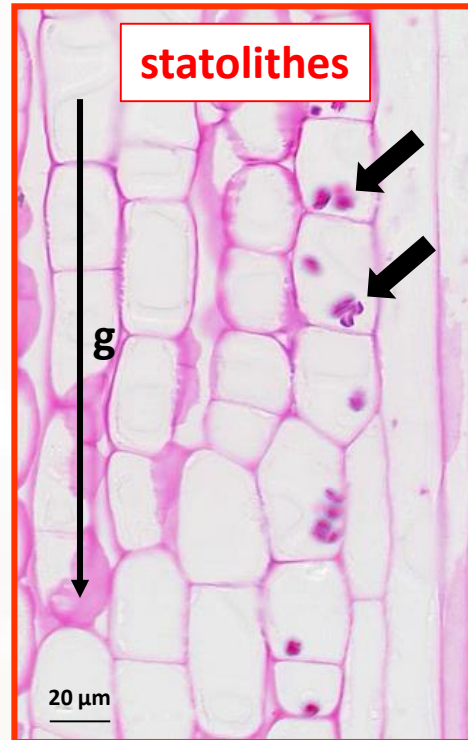
## 1. La lumière du soleil (haut) ?

**En lumière « isotrope »  
(qui vient de toutes les directions)**



# Que perçoit l'arbre incliné?

## 2. La gravité terrestre (bas) ?



Chauvet et al, 2016, Nature

*Des cellules spéciales (STATOCYTES) contenant des  
**STATOLITHES***

**Merci de votre attention**





# The MECA Team



**Eric BADEL**  
[eric.badel@inrae.fr](mailto:eric.badel@inrae.fr)